

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-230445

(43)Date of publication of application : 24.08.2001

(51)Int.Cl.

H01L 33/00

H04B 10/00

H04L 9/38

(21)Application number : 2000-039212

(71)Applicant : NEC CORP

(22)Date of filing : 17.02.2000

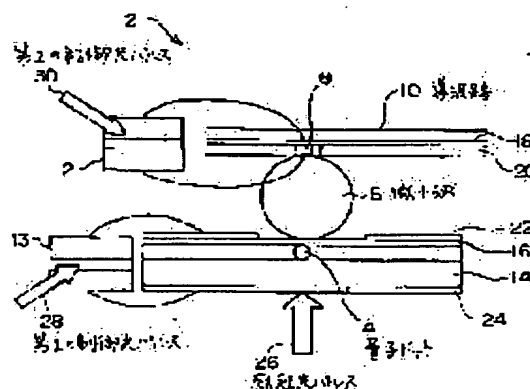
(72)Inventor : TOMITA AKIHISA

## (54) SINGLE-PHOTON GENERATION DEVICE

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To emit a single photon to the outside of a device at a set time.

SOLUTION: When a quantum dot 4 is irradiated with excitation optical pulses 26, only one electron is excited in the quantum dot, and the excited electron is recombined so as to generate one photon. Since a very small sphere 6 which constitutes a resonator has a mode which resonates with the photon, the photon exists inside the very small sphere 6, and the very small sphere 6 is set to a resonance state. When a second photoelectric switch 12 is irradiated with second control optical pulses 20, the second photoelectric switch 12 generates a voltage so as to be applied to a connection member 8. As a result, the refractive index of the connection member 8 is changed. Consequently the reflection factor in the boundary face between the very small sphere 6 and the connection member 8 is lowered, the photon inside the very small sphere 6 can be transmitted to the side of the connection member 8, and it enters a waveguide 10 through the connection member 8 so as to be emitted to the outside of the device by the waveguide 10.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

16.01.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

3422482

[Date of registration]

25.04.2003

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-230445

(P2001-230445A)

(43) 公開日 平成13年8月24日 (2001.8.24)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード <sup>*</sup> (参考)
H 0 1 L 33/00		H 0 1 L 33/00	A 5 F 0 4 1
H 0 4 B 10/00		H 0 4 B 9/00	Z 5 J 1 0 4
H 0 4 L 9/38		H 0 4 L 9/00	6 9 1 5 K 0 0 2

審査請求 有 請求項の数14 O L (全 7 頁)

(21) 出願番号 特願2000-39212(P2000-39212)

(22) 出願日 平成12年2月17日 (2000.2.17)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 富田 章久

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(74) 代理人 100089875

弁理士 野田 茂

Fターム(参考) 5F041 AA31 CA05 EE25 FF16

5J104 AA01 AA16 EA04

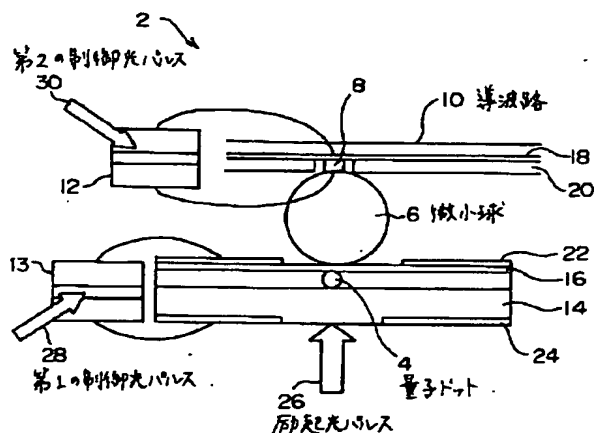
5K002 AA07 BA07 CA12

(54) 【発明の名称】 単一光子発生装置

(57) 【要約】

【課題】 単一の光子を定まった時刻に装置外に放出する。

【解決手段】 励起光パルス26を量子ドット4に照射すると、量子ドット4では1つのみの電子が励起され、励起された電子が再結合して1つの光子が生成される。共振器を構成する微小球6はこの光子に共鳴するモードを有しているため、光子は微小球6内に存在して、微小球6は共鳴状態となる。その後、第2の制御光パルス30を第2の光電スイッチ12に照射すると、第2の光電スイッチ12は電圧を発生して連結部材8に印加し、その結果、連結部材8の屈折率が変化する。これにより、微小球6と連結部材8との境界面の反射率が低下し、微小球6内の光子は、連結部材8側に透過可能となり、連結部材8を通じ導波路10に入って導波路10より装置外に放出される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 発生させるべき光子に対応するエネルギー準位を持ち、光が照射されるか、または電界が印加されたとき1つのみの電子が励起される能動媒質と、前記能動媒質に連結された、前記光子に共鳴するモードを有する共振器と、前記共振器に連結されて、前記共振器を出た前記光子を導く光導出部と、前記共振器と前記光導出部との間に介在する、前記光子に対して透明な連結部材と、前記能動媒質で電子が励起された後、前記連結部材の屈折率を変化させる屈折率制御手段とを備えたことを特徴とする単一光子発生装置。

【請求項2】 発生させるべき光子に対応するエネルギー準位を持ち、光が照射されるか、または電界が印加されたとき1つのみの電子が励起される能動媒質と、前記能動媒質に連結された、前記光子に共鳴するモードを有する共振器と、前記共振器に連結されて、前記共振器を出た前記光子を導く光導出部と、前記能動媒質で電子が励起された後、前記共振器の屈折率を変化させる屈折率制御手段とを備えたことを特徴とする単一光子発生装置。

【請求項3】 前記光子よりも高いエネルギーの光子から成り継続時間が前記能動媒質の発光再結合時間より短い光パルスを生じ、前記能動媒質に供給する励起手段を備えたことを特徴とする請求項1または2に記載の単一光子発生装置。

【請求項4】 パルス状の電界を前記能動媒質に印加してトンネル障壁を通じ前記能動媒質を励起する励起手段を備えたことを特徴とする請求項1または2に記載の単一光子発生装置。

【請求項5】 前記共振器は半導体または誘電体から成る微小体であることを特徴とする請求項1または2に記載の単一光子発生装置。

【請求項6】 前記共振器は、屈折率が異なる2つ以上の物質を光の波長程度の周期で交互に配列して構成したフォトニック結晶において、前記物質の配列の周期が他の箇所と異なる局所として形成されていることを特徴とする請求項1に記載の単一光子発生装置。

【請求項7】 前記連結部材は電気光学効果を有する材料を含み、前記屈折率制御手段は前記連結部材に電界を印加して前記連結部材の屈折率を変化させることを特徴とする請求項1記載の単一光子発生装置。

【請求項8】 前記連結部材は非線形光学効果を有する材料を含み、前記屈折率制御手段は前記連結部材に光を照射して前記連結部材の屈折率を変化させることを特徴とする請求項1記載の単一光子発生装置。

【請求項9】 前記屈折率制御手段は、前記能動媒質が励起された後、前記能動媒質の発光再結合時間より長い

時間が経過した時点で前記連結部材の屈折率を変化させることを特徴とする請求項1記載の単一光子発生装置。

【請求項10】 前記共振器は非線形光学効果を有する材料を含み、前記屈折率制御手段は前記共振器に光を照射して前記共振器の屈折率を変化させることを特徴とする請求項2記載の単一光子発生装置。

【請求項11】 前記共振器は電気光学効果を有する材料を含み、前記屈折率制御手段は前記共振器に電界を印加して前記共振器の屈折率を変化させることを特徴とする請求項2記載の単一光子発生装置。

【請求項12】 前記屈折率制御手段は、前記能動媒質が励起された後、前記能動媒質の発光再結合時間より長い時間が経過した時点で前記共振器の屈折率を変化させることを特徴とする請求項2記載の単一光子発生装置。

【請求項13】 前記能動媒質が前記光子を放出した後に、前記能動媒質の共鳴エネルギーを変化させる能動媒質制御手段を備えたことを特徴とする請求項1または2に記載の単一光子発生装置。

【請求項14】 前記能動媒質制御手段は前記能動媒質に電界を印加することで前記能動媒質の共鳴エネルギーを変化させることを特徴とする請求項13記載の単一光子発生装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、量子暗号伝送などに用いる単一光子発生装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】インターネットの爆発的な普及や、電子商取引の実用化を迎え、通信の秘密保持および改竄防止、個人の認証などのために、暗号技術の社会的な必要性が高まっている。現在広く用いられている暗号技術としては、DES暗号のような共通鍵方式やRAS暗号をはじめとする公開鍵方式のものが有る。しかし、これら現行の暗号技術は、「計算量的安全性」にその基盤を置いているため、計算機ハードウェアと暗号解読アルゴリズムの進歩に常に脅かされている。したがって、特に銀行間のトランザクションや軍事・外交にかかわる情報などの極めて高い安全性が要求される分野では、原理的に安全な暗号方式が実用化されれば、そのインパクトは大きい。

【0003】量子暗号の研究は、ベネット（Benett）とブラッサード（Brassard）らによってIEEEコンピュータ、システム、信号処理国際会議（IEEE Int. Conf. on Computers, Systems, and Signal Processing, Bangalore, India, p. 175, (1984)）でなされた具体的なプロトコルの提案を契機に盛んに行われるようになった。

【0004】情報理論で無条件安全性が証明されている暗号方式にワンタイムパッドがある。提案された上記量

子暗号プロトコルは、これに用いる暗号鍵を安全に配送する方法を示したものである。量子暗号は物理法則が暗号の安全性を保証するため、計算機能力の限界に依存しない究極の安全性保証が可能になる。この種の量子暗号は盗聴者が1つの光子の状態を完全に知ることはできないことを安全性の基礎としている。それゆえ、量子暗号では、1ビットの情報を伝送するのに唯1つの光子を用いることが安全性の保証に必要となる。つまり、定まった時刻に確実に単一の光子を発生することが量子暗号装置の重要な課題となっている。

【0005】量子暗号の実現には絡み合った光子対の利用が有効であることが知られている。たとえば、ブリーゲル(Briegel)らは、絡み合った光子対を用いて量子状態の中継ができることを報告している(Physical Review Letters, 81巻、5932ページ、1998年)。通常、絡み合った光子対の発生にはパラメトリックダウンコンバージョンと呼ばれる方法が用いられる。この方法は、非線形光学結晶に光を入力し発生する入力光の1/2のエネルギーを持つ光の対を取り出すものである。しかしながら、この方法ではエネルギーと波数の保存則を満たす範囲で同時に多数の光子の組み合わせが可能のため、求める光子対の発生は確率的で、しかも発生効率は10万分の1程度ときわめて小さく、実用にはならない。

【0006】これに対して、2つの単一光子発生装置の出力を制御NOTゲートなどの量子ゲートに入力することでも絡み合った光子対が得られる。この方法では効率よく絡み合った光子対が得られるため、有効であるが、単一光子発生装置と光子制御装置(量子ゲート)という2つの装置を新たに必要とする。

【0007】量子暗号に用いることができる単一光子発生装置の実現という目的のためには(1)唯1つの電子のみを励起し、電子が光子を出して基底状態に戻るまで励起状態を保持すること、および(2)定まった時刻に光子を装置の外に出すこと、の2つが必要である。唯1つの電子を励起するために、デマルチーニ(De Martini)らの報告(Physical Review Letters, 76巻、900ページ、1996年)、およびローとキンブル(Law and Kimble)の報告(Journal of Modern Optics, 44巻、2067ページ、1997年)では、励起パルス光の強度と時間幅を制御することが提案されている。

【0008】また、須佐は特開平4-61176号公報で、半導体薄膜に電子が1つあることによる電界の変化によって電子のトンネルができなくなる現象、いわゆるクーロンブロッケイドを用いて半導体活性層に電子を1つずつ注入する単一光子発生素子を提案している。キム(Kim)らはこの技術と類似の原理でターンスタイルと呼ばれる方法によって半導体活性層に1つずつ電子を

注入する単一光子発生素子を報告している(Nature誌、397巻、500ページ、1999年)。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、須佐やキムらの単一光子発生手法では、光子の発生は励起状態の寿命で決まる時間幅で起こる確率的な事象となり、そして発生した光子は直ちに装置外に放出される。そのため、光子が放出される時間幅はナノ秒程度のかかなり広いものとなる。通常用いられる光子の検出器ではこの程度の時間的なずれは分解できるので、定まった時刻に光子を装置外に出すという点で不十分である。

【0010】他方、デマルチーニやローとキンブルのようにQ値の高い微小共振器を用いると、発光確率が增大することが知られている。この効果を利用すると発光の時間幅を狭めることができる。しかしながら、発生した光子は微小共振器からなかなか出ることができず、長い時間をかけて共振器から漏れ出す。そのため、光子が装置外に放出される時刻は確定しなくなるという問題は解決されない。

【0011】たとえば、コロット(Collett)らは $2 \times 10^9$ という高いQ値がウィスバリングギャラリモード共振器で得られたことを報告している(European Physics Letters, 23巻、327ページ、1994年)。光の周波数は $10^{15}$  Hzのオーダーであるからこの共振器における光子寿命はマイクロ秒近くにもなる。

【0012】本発明はこのような問題を解決するためになされたもので、その主な目的は、単一の光子を定まった時刻に装置外に放出することが可能な単一光子発生装置を提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記目的を達成するため、発生させるべき光子に対応するエネルギー準位を持ち、光が照射されるか、または電界が印加されたとき1つのみの電子が励起される能動媒質と、前記能動媒質に連結された、前記光子に共鳴するモードを有する共振器と、前記共振器に連結されて、前記共振器を出た前記光子を導く光導出部と、前記共振器と前記光導出部との間に介在する、前記光子に対して透明な連結部材と、前記能動媒質で電子が励起された後、前記連結部材の屈折率を変化させる屈折率制御手段とを備えたことを特徴とする。

【0014】また、本発明は、発生させるべき光子に対応するエネルギー準位を持ち、光が照射されるか、または電界が印加されたとき1つのみの電子が励起される能動媒質と、前記能動媒質に連結された、前記光子に共鳴するモードを有する共振器と、前記共振器に連結されて、前記共振器を出た前記光子を導く光導出部と、前記能動媒質で電子が励起された後、前記共振器の屈折率を変化させる屈折率制御手段とを備えたことを特徴とす

る。

【0015】本発明の単一光子発生装置では、継続時間が十分に短いパルス状の光を能動媒質に照射するか、または電界を能動媒質に印加すると、能動媒質では1つのみの電子が励起され、励起された電子が再結合して1つの光子が生成される。共振器はこの光子に共鳴するモードを有しているため、光子は共振器内に存在して、共振器は共鳴状態となる。その後、屈折率制御手段が、連結部材の屈折率を変化させると、共振器と連結部材との境界面の反射率が低下し、共振器内の光子は、連結部材側に透過可能となり、連結部材を通じ光導出部に入って光導出部より装置外に放出される。

【0016】また、本発明の単一光子発生装置では、継続時間が十分に短いパルス状の光を能動媒質に照射するか、または電界を能動媒質に印加すると、能動媒質では1つのみの電子が励起され、励起された電子が再結合して1つの光子が生成される。共振器はこの光子に共鳴するモードを有しているため、光子は共振器内に存在して、共振器は共鳴状態となる。その後、屈折率制御手段が、共振器の屈折率を変化させると、共振器の共鳴状態が解消され、共振器内の光子は共振器内に存在できなくなって光導出部に入り、光導出部より装置外に放出される。したがって、本発明により、能動媒質を励起するタイミング、および屈折率制御手段を起動するタイミングを適切に設定して、単一の光子を定まった時刻に装置外に放出することが可能となる。

【0017】

【発明の実施の形態】次に本発明の実施の形態例について図面を参照して説明する。図1は本発明による単一光子発生装置の一例の構成を示す断面側面図、図2は図1の単一光子発生装置の動作を示すタイミングチャートである。図1に示したように、本発明の第1実施の形態例の単一光子発生装置2は、量子ドット4（能動媒質）、微小球6（共振器）、連結部材8、導波路10（光導出部）、ならびに第2の光電スイッチ12（屈折率制御手段）などを含んで構成されている。

【0018】量子ドット4は、発生させるべき光子に対応するエネルギー準位を持ち、光が照射されたとき1つの電子が励起されて、励起が飽和する。量子ドット4は、半導体基板14上に半導体材料により形成され、量子ドット4の上には、量子ドット4で発生する光子に対して透明な、半導体材料から成るキャップ層16が量子ドット4に接して形成されている。このキャップ層16により量子ドット4の表面における電子の再結合が低減する。キャップ層16の厚さは量子ドット4が発生する光子の波長の $1/2$ 以下となっており、したがって微小球6からしみだした光はキャップ層16を通じて量子ドット4と結合することができる。

【0019】微小球6は、量子ドット4が発生する光子に対して透明な材料により球状に形成され、量子ドット

4の上にキャップ層16を介し、キャップ層16に接して配置されている。微小球6の半径は、上記光子の波長の数分の1から100倍に設定する。そして、微小球6のウィスバリングギャリモードは、上記光子のエネルギーに共鳴しており、したがって微小球6はQ値高い共振器として作用する。

【0020】導波路10は、微小球6を出た光子を装置外に導くべく、微小球6の上部に延設されている。導波路10は、コア18とクラッド20とから成り、クラッド20の下側は、微小球6の頂部において一部が除去され、コア18が露出している。そして露出したコア18と微小球6の頂部との間に、電気光学効果材料から成り、上記光子に対して透明な連結部材8が介在している。導波路10と微小球6の頂部との間の距離は、微小球6の上記ウィスバリングギャリモードに対して微小球6と導波路10との結合が最小となる距離に設定されている。

【0021】第2の光電スイッチ12は、たとえば低温で成長させた半導体層に数マイクロメートルの間隔で電極を形成して成り、その電極の間に光を入射させると上記電極間に電圧が発生する。この電圧は連結部材8に印加されている。第2の光電スイッチ12の応答時間は、光子発生時間より十分に短く、時間的に高精度で連結部材8に電圧を印加することができる。

【0022】本実施の形態例ではさらに、第2の光電スイッチ12と同様の構成を有する第1の光電スイッチ13（能動媒質制御手段）が設けられている。半導体基板14の上下面には、図1に示したように、量子ドット4の箇所を除いて電極22、24が形成されており、第1の光電スイッチ13が発生した電圧は電極22、24間に印加される。

【0023】次に、このように構成された単一光子発生装置2の動作について、図2をも参照しつつ説明する。まず、タイミングT1において、量子ドット4に量子ドット4の遷移エネルギーより大きく、半導体基板14やキャップ層16のバンドギャップより小さなエネルギーを持つ光のパルス、すなわち励起光パルス26を照射する。この励起光パルス26の時間幅（継続時間）は、量子ドット4の発光再結合時間より短いものに設定する。

【0024】量子ドット4では、このような励起光パルス26が照射されたことで、電子が1つ励起される。なお、量子ドット4の1つのエネルギー準位には2つの電子が励起され得るが、量子ドット4に電子が2つ励起されるときエネルギーは電子間相互作用のため電子が1つ励起されるときエネルギーとは異なるため、励起光パルス26では電子が2つ励起されることはない。また、励起光パルス26の時間幅を、量子ドット4の再結合時間より長くすると、量子ドット4で励起された電子が再結合して光子を発生し、量子ドット4が再び励起されて2つ以上の光子が発生してしまう可能性がある。そ

のため、励起光パルス26の時間幅は上述のように量子ドット4の再結合時間より短いものに設定する。

【0025】励起された量子ドット4の電子は微小球6のウィスパリングギャリモードに共鳴しているため自由空間にあるときより短い時間で再結合して光子を放出する。自由空間に置かれたときとの自然放出確率の比は $(3/4\pi)(\lambda^3/V)Q$ となる。具体的な数値の例をあげると、共振器（本実施の形態例では微小球6）の特徴的な長さが波長の100倍でQが $10^9$ のとき自然放出確率は自由空間の $10^3$ 倍に増大する。なお、 $\lambda$ は光子の波長、 $V$ は共振器の体積、 $Q$ は共振器のQ値である。

【0026】半導体の発光再結合寿命は10ns程度であるから、微小球6内では10psとなり、したがって光子が微小球6内に発生する時刻を精度よく決めることができる。共振器の大きさがこれより大きくなってもQ値の改善は見込めず逆に体積が大きくなるため自然放出確率が低下する。一方、共振器の特徴的な長さが波長の数分の1以下になるとQ値が低下するため自然放出確率が低下する。

【0027】電子の励起後、電子の再結合時間が過ぎると光子L（図2）が発生し、微小球6のウィスパリングギャリモードには1つの光子が存在する（タイミングT2）。次に、タイミングT3で第1の光電スイッチに第1の制御光パルス28を入射させる。これにより第1の光電スイッチ13は電圧を発生して半導体基板14の電極22、24間に印加し、その結果、量子ドット4に電界が印加されて量子ドット4の共鳴エネルギーが変化し、微小球6との共鳴状態が解消されて量子ドット4は微小球6から切り離された状態となる。よって、微小球6内の光子は、量子ドット4で再吸収されることがなくなる。

【0028】その後、タイミングT4において、第2の光電スイッチ12に第2の制御光パルス30を入射すると、第2の光電スイッチ12は電圧パルスを発生して連結部材8に印加する。これにより電気光学効果材料から成る連結部材8の屈折率が変化し、連結部材8に接する微小球6の反射面における光の反射率が低下し、微小球6のウィスパリングギャリモードに対して導波路10が結合して光子が導波路10に移り導波路10を通じて装置外に放出される。

【0029】したがって、第1の実施の形態例の単一光子発生装置2では、第1および第2の制御光パルス28、30を第1および第2の光電スイッチ、12にそれぞれ供給するタイミングを制御することで、単一の光子を定まった時刻に装置外に放出することが可能である。そして、連結部材8において、電圧が印加されて電気光学効果によりその屈折率が変化する速さは回路の時定数で決まるが、この速度は十分に高速であり、第2の光電スイッチ12の作動速度も含め、第2の制御光パルス30

0によって光子放出のタイミングをピコ秒程度の精度で決定することができる。

【0030】なお、ここでは励起光パルス26、第1および第2の制御光パルス28、30をそれぞれ1回ずつ照射したが、これらを上述のような時間関係を維持して繰り返し照射すれば、その都度、1つの光子を放出することができる。第1の実施の形態例では、上述のように量子ドット4に励起光パルス26を照射して1つの電子を励起したが、半導体による量子ドット4の最低順位にはスピンの向きが異なる2つの電子しか入ることができないので、円偏光を持つ光パルスで量子ドット4を励起することで、1つの電子のみを励起することも可能である。

【0031】また、能動媒質としては、他の準位から十分エネルギーが離れた励起準位を持つ原子や分子を用いることも可能である。その場合にも、励起光パルス26の幅を発光再結合寿命より十分短くすることで、1回の励起パルスで励起される電子の数を1つに抑えて、上記量子ドット4の場合と同様に、単一の光子を発生させることができる。さらに、能動媒質は光を照射して励起する以外にも、トンネル障壁を通じて電気パルスで励起する構成とすることも可能である。

【0032】そして、第1の実施の形態例では、共振器を微小球6のウィスパリングギャリモードを用いて実現したが、もちろん共振器の形は高いQ値が得られるものであれば真球である必要はなく、たとえば円盤状であってもよい。また、微小球6は、半導体以外にも誘電体により形成することも可能である。さらに、屈折率の異なる材料を波長程度の周期で配列したいいわゆるフォトリソグラフィの一部で局所的に周期性を乱して得られる欠陥部を、微小共振器として利用することもできる。このような共振器によっても高いQ値を得ることができる。共振器としては、その他にも、Q値が高いものであればいかなる形態のものであってもかまわない。

【0033】連結部材8は、本実施の形態例では、電気光学効果を持つ材料により形成するとしたが、非線形光学効果を持つ材料により連結部材8を構成することも可能である。その場合には、光電スイッチを用いず、直接光パルスを連結部材8に照射して屈折率を変化させることができるため構成が簡素になる。また、この場合にも光子放出のタイミングはピコ秒程度の精度で決定することができる。ただし、連結部材8に照射する制御用の光パルスの光子エネルギーは、発生させるべき光子のエネルギーとは異なるものにする必要がある。また、制御用の光パルスは発生させるべき光子のエネルギー付近に非線形光混合などで光子を発生しない範囲でいくら強くてもよいので非線形光学効果を持つ材料としては通常のものを用いることができる。そして、本実施の形態例では、連結部材8には第2の光電スイッチ12により電圧を印加したが、電気パルスを波形変形を生じることなく

伝達できるのであれば、何らかの電気パルス発生装置から直接連結部材8に電気パルスを印加する構成とすることも可能である。

【0034】次に、本発明の第2の実施の形態例について説明する。図3は第2の実施の形態例の単一光子発生装置2を示す断面側面図、図4の(A)および(B)は、第2の実施の形態例の動作を示す断面側面図である。第2の実施の形態例の単一光子発生装置32が上記第1の実施の形態例の単一光子発生装置2と基本的に異なるのは、共振器内の光子を、共振器自体の屈折率を変化させることで光導出部に移行させる点である。図3に示したように、第2の実施の形態例の単一光子発生装置32は、半導体層34、微小共振器36、半導体による量子ドット38(能動媒質)、導波路40(光導出部)などにより構成されている。半導体層34は、誘電体層(図示せず)の上に半導体材料を堆積させて形成されており、この半導体層34には、発生させるべき光子の実行的な波長程度の間隔で穴34Aが三角格子状に、一部を除いて規則的に形成され、半導体層34はフォトニック結晶となっている。フォトニック結晶の中では光子の状態密度が0になるエネルギー領域、いわゆるフォトニックバンドギャップができる。ただし、穴を形成せず半導体を一部残した箇所では、光が局在したモードが形成される。このモードはフォトニックバンドギャップ中に数個存在し、おのおの異なる電界分布を持つ。この光が局在した部分が微小共振器36となる。

【0035】量子ドット38は、微小共振器36のほぼ中央に配置され、微小共振器36に結合されている。そして量子ドット38の遷移エネルギーと微小共振器36のモードの1つのエネルギーが一致するように条件が設定されている。導波路40は、その一端部42が微小共振器36に近接した状態で、半導体層34に延設されている。より詳しくは、図4の(A)に示したように、微小共振器36内に光子が存在する際に、同光子のモードの電界分布44が相対的に小さくなる箇所44Aに、導波路40の上記一端部42が位置している。

【0036】このように構成された単一光子発生装置32において、第1の実施の形態例の場合と同様に、励起光パルス26を照射し量子ドット38において1つの電子を励起すると、微小共振器36の中に1つ光子が存在するようになる。同光子のモードの電界分布44は上述のように導波路40の付近では小さいため(図4の(A))、微小共振器36のQ値は高い値となっている。この状態で、不図示の制御光パルス発生手段(屈折率制御手段)により制御光パルス27を微小共振器36に照射すると、半導体の非線形光学効果により微小共振器36内の屈折率が変化し、図4の(B)に示したように電界分布44が変化し、光子のモードが導波路40とよく結合するモードに変わる。その結果、光子は速やかに導波路40に入り、導波路40を通じて装置外に放

出される。

【0037】したがって、この第2の実施の形態例の単一光子発生装置32においても、量子ドット38に励起光パルス26を照射するタイミング、および上記制御光パルス発生手段を起動するタイミングを制御することで、単一の光子を定まった時刻に装置外に放出することが可能である。

【0038】なお、量子ドット38としては、半導体によるもの以外にも、所望エネルギーの光子を発生可能な原子や分子、イオンなどによるものを用いることも可能である。また、第2の実施の形態例では、微小共振器36を形成するためのフォトニック結晶を、半導体層34に三角格子状の穴を配列することで構成したが、フォトニック結晶としては、所望エネルギーの光の波長でフォトニックバンドギャップを有するものであればどのような形態のものであってもよい。

【0039】そして、高いQ値を持つ微小共振器36としては、微小球のウィスバリングギャリモードを用いてもよく、その場合には微小球に制御光パルスを照射してその屈折率を変化させることで、微小球6内の光子を導波路40に移行させることができる。エネルギーの近いウィスバリングギャリモードは数個存在し、おのおのモードの電界分布は異なるため、この場合にも上述の場合と同様に電界分布の切り換えが可能である。また、第2の実施の形態例では、微小共振器36の屈折率を変化させるために半導体の非線形光学効果を利用したが、電気光学効果を持つ材料により微小共振器を形成し、光電スイッチや電気パルスにより電界を加えて屈折率を変化させる構成とすることも可能である。

【0040】

【発明の効果】以上説明したように本発明の単一光子発生装置では、継続時間が十分に短いパルス状の光を能動媒質に照射するか、または電界を能動媒質に印加すると、能動媒質では1つのみの電子が励起され、励起された電子が再結合して1つの光子が生成される。共振器はこの光子に共鳴するモードを有しているため、光子は共振器内に存在して、共振器は共鳴状態となる。その後、屈折率制御手段が、連結部材の屈折率を変化させると、共振器と連結部材との境界面の反射率が低下し、共振器内の光子は、連結部材側に透過可能となり、連結部材を通じ光導出部に入って光導出部より装置外に放出される。

【0041】また、本発明の単一光子発生装置では、継続時間が十分に短いパルス状の光を能動媒質に照射するか、または電界を能動媒質に印加すると、能動媒質では1つのみの電子が励起され、励起された電子が再結合して1つの光子が生成される。共振器はこの光子に共鳴するモードを有しているため、光子は共振器内に存在して、共振器は共鳴状態となる。その後、屈折率制御手段が、共振器の屈折率を変化させると、共振器の共鳴状態

が解消され、共振器内の光子は共振器内に存在できなくなって光導出部に入り、光導出部より装置外に放出される。したがって、本発明により、能動媒質を励起するタイミング、および屈折率制御手段を起動するタイミングを適切に設定して、単一の光子を定まった時刻に装置外に放出することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による単一光子発生装置の一例の構成を示す断面側面図である。

【図2】図1の単一光子発生装置の動作を示すタイミングチャートである。

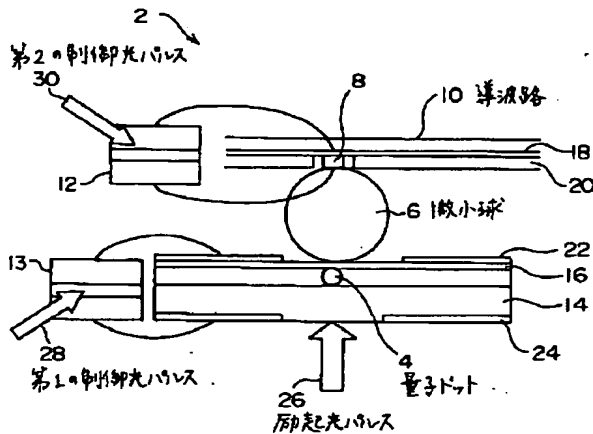
【図3】第2の実施の形態例の単一光子発生装置を示す断面側面図である。

【図4】(A)および(B)は、第2の実施の形態例の動作を示す断面側面図である。

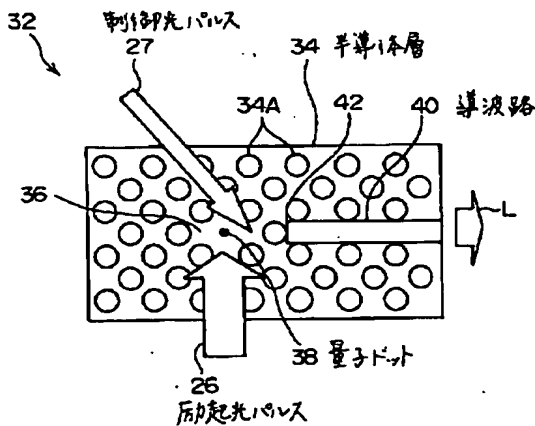
【符号の説明】

2……単一光子発生装置、4……量子ドット、6……微小球、8……連結部材、10……導波路、12……第2の光電スイッチ、13……第1の光電スイッチ、14……半導体基板、16……キャップ層、18……コア、20……クラッド、22……電極、24……電極、26……励起光パルス、28……第1の制御光パルス、30……第2の制御光パルス、32……単一光子発生装置、34……半導体層、36……微小共振器、38……量子ドット、40……導波路、42……一端部、44……電界分布。

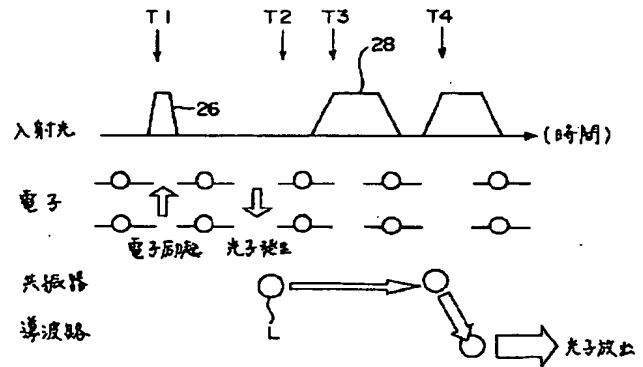
【図1】



【図3】



【図2】



【図4】

